

- Pelykh, S. N. Cladding rupture life control methods for a power-cycling WWER-1000 nuclear unit / S. N. Pelykh, M. V. Maksimov // Nuclear Engineering and Design. – 2011. – Vol. 241, № 8. – P. 2956 – 2963.
- Maksimov, M. V. Principles of controlling fuel-element cladding lifetime in variable VVER-1000 loading regimes / S. N. Pelykh, M. V. Maksimov, R. L. Gontar // Atomic Energy – 2012. – Iss. 4(112). – P. 241–249.
- Pelykh, S. N. Grounds of VVER-1000 fuel cladding life control / S. N. Pelykh, M. V. Maksimov, V. E. Baskakov // Annals of Nuclear Energy. – 2013. – Iss. 58. – P. 188–197.
- Pelykh, S. N. A method for VVER-1000 fuel rearrangement optimization taking into account both fuel cladding durability and burnup / S. N. Pelykh, M. V. Maksimov, G. T. Parks // Nuclear Engineering and Design. – 2013. – Vol. 257, № 4. – P. 53–60.
- Maksimov, M. V. The method of fuel rearrangement control considering fuel element cladding damage and burnup / S. N. Pelykh, M. V. Maksimov // Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science. – 2013. – Iss. 5(87). – P. 24 – 36.
- Maksimov, M. V. Theory of VVER-1000 fuel rearrangement optimization taking into account both fuel cladding durability and burnup / S. N. Pelykh, M. V. Maksimov // Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science. – 2013. – Iss. 2(84). – P. 50–54.
- Филимонов, П. Е. Программа "Имитатор реактора" для моделирования маневренных режимов работы ВВЭР-1000 [Текст] / П. Е. Филимонов, В. В. Мамичев, С. П. Аверьянова // Атомная энергия. – 1998. – Т. 84, № 6. – с. 560 – 563.
- Maksimov, M. V. A model of a power unit with VVER-1000 as an object of power control [Текст] / M. V. Maksimov, K. V. Beglov, T. A. Tsiselskaya // Пр. Одес. політехн. ун-ту. - 2012. - Вип. 38, №1. - С. 99-106.
- Копелович, А. П. Инженерные методы расчета при выборе автоматических регуляторов [Текст] / А. П. Копелович. – М. : Госуд. науч.-техн. изд. лит. по черн. и цвет. Металлургии, 1960. – с. 75–92.

Наведена методика розрахунку водно-хімічного режиму комплексної зворотної системи охолодження з рециркуляційною очисткою частки циркуляційної води на передньо включеному освітлювачі. На підставі результатів розрахунку концентрації вуглецевої кислоти CO_2 , іонів HCO_3^- , CO_3^{2-} , OH^- , показника рН та експериментальної залежності $j_{відкл.} = f(\mathcal{J}_{Ca})$ розраховується прогнозована за відрізок часу питома маса і товщина відкладень на теплообмінних трубках конденсатора

Ключові слова: зворотня система охолодження, рециркуляція, циркуляційна вода, продувна вода, концентрування, відкладення

СПриведена методика расчета водно-химического режима комплексной оборотной системы охлаждения с рециркуляционной очисткой части продувки на предвключённом осветлителе. На основании результатов расчета концентрации углекислоты CO_2 , ионов HCO_3^- , CO_3^{2-} , OH^- , показателя рН и экспериментальной зависимости $j_{отл.} = f(\mathcal{J}_{Ca})$ рассчитывается прогнозируемая за отрезок времени удельная масса и толщина отложений на теплообменных трубках конденсатора

Ключевые слова: оборотная система охлаждения, рециркуляция, циркуляционная вода, продувочная вода, концентрирование, отложения

УДК 621.311.22

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА КОМПЛЕКСНОЙ ОБОРОТНОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ С РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ

В. А. Кишневский

Доктор технических наук, профессор*

E-mail: twf.onpu@gmail

В. В. Чиченин

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: ch-v-v@yandex.ru

И. Д. Шуляк*

E-mail: Irina_Shulyak@ukr.net

*Кафедра технологии воды и топлива

Одесский национальный

политехнический университет

пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044

1. Введение

Одним из основных факторов, влияющих на надежность эксплуатации теплообменного оборудования атомных электрических станций, является организация рациональных водно-химических режимов ее элементов

[1]. Находящиеся в эксплуатации в Украине оборотные системы охлаждения АЭС спроектированы по нормативной документации [2, 3] начала второй половины XX века, основанной на существующих в то время теоретических предпосылках [4] и опыте эксплуатации тепловых электрических станций небольшой мощности.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Перспективным направлением методов совершенствования ВХР оборотных систем охлаждения АЭС является введение ингибиторов отложений накипеобразователей [5, 6] и использование комплексных оборотных систем охлаждения с включением в систему установок кондиционирования добавочной и циркуляционной вод, со структурными изменениями и минимизацией сбросов продувок в окружающую среду и обоснование методов расчета водно-химического режима (ВХР) комплексной оборотной системы охлаждения (КОСО) с долгосрочным прогнозированием результатов их эффективной эксплуатации [7].

Однако аналитического метода обоснования выбора решений, позволяющего оценить соотношение направлений на основании некоторого общего критерия, в отечественной нормативной базе по проектированию и эксплуатации КОСО не существует. Как правило, расчёты базируются на формальном использовании эмпирического критерия стабильности Г. Е. Крушеля [8] для получения расчётного $C_{кр}$, который в несколько раз отличается от истинного значения. Нормативная документация по организации ВХР КОСО, которая базируется на подобных определениях $C_{кр}$, предполагает слабо ограниченную свободу выбора оптимального ВХР КОСО электростанции с заданным физико-химическим составом охлаждающей воды и наладкой режима в течение нескольких лет после ввода электростанции в эксплуатацию. Эффективность принятого после пуска электростанции ВХР КОСО, в конечном итоге, определяется рамочными возможностями установленного оборудования и структурой КОСО. При разработке нового ВХР приходится сталкиваться со сложными проблемами: согласование выбранной коррекционной обработки с проектными организациями; разработка и согласования нормативов по ПДК [9, 10] и сбросам применяемых реагентов; выделение дополнительных средств на закупку оборудования и реагентов и др. Кроме того, в течение многолетней наладки ВХР ОСО возникают проблемы целостности конденсаторов и, как следствие, нарушение ВХР второго контура, заносы испарительных поверхностей градирен, преждевременные химические очистки конденсаторов и парогенераторов [11, 12].

В течение многих лет после пуска до введения эффективного ВХР станция работает при сниженной мощности энергооборудования, что приводит к недовыработке электроэнергии [13].

3. Методика расчета ВХР разомкнутой КОСО

В работе на примере разомкнутой КОСО с рециркуляционной очисткой части продувки на предвключенной ВПУ и продувками осветлителя и циркуляционного контура (рис. 1) с подпиткой речной водой (табл. 1) показана методика расчета водно-химического режима системы с прогнозируемой толщиной отложений за выбранный отрезок времени.

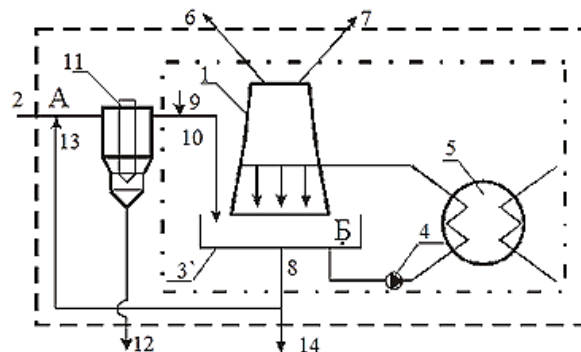


Рис.1. Схема ВХР разомкнутой КОСО с рециркуляционной очисткой части циркуляционной воды на предвключенной ВПУ и организованными продувками циркуляционного контура и осветлителя: 1 – градирня, 2 – добавочная вода, 3 – приемок градирни (ковш), 4 – насос, 5 – конденсатор, 6 – удельные потери воды на испарение P_1 , 7 – удельные потери воды с капельным уносом P_2 , 8 – удельные потери воды на продувку P_3 , 9 – ввод реагентов, 10 – кондиционированная вода, 11 – осветлитель, 12 – сброс продувки осветлителя $P_{осв}$, 13 – отбор части продувки КОСО на известкование, P_3' , 14 – сброс продувки, P_3''

При направлении части продувки P_3' на осветлитель необходимо исследовать соблюдение граничных условий растворимости солей $Mg(OH)_2$ и $CaSO_4^{2-}$ в процессе известкования и упаривания в цикле КОСО. Выпадение этих солей из раствора в процессе известкования речной воды в смеси с добавком циркуляционной возможно для рассматриваемой схемы.

При построении материально-солевого баланса рассматриваемой системы основные ионные примеси в циркуляционной воде целесообразно разделить на две группы:

- ионы, проходящие осветлитель транзитом: $[Na^+]$, $[CO_3^{2-}]$, $[Mg^{2+}]$, $[SO_4^{2-}]$.

- ионы, изменяющиеся качественно и количественно в процессе известкования и упаривания: $[HCO_3^-]$, $[CO_3^{2-}]$ и $[Ca^{2+}]$.

На первом этапе расчета рассматривается материальный баланс потоков системы и их соотношения, и оцениваются удельные величины:

- доли добавочной воды:

$$P = P_1 + P_2 + P_3'' + P_{осв}, \quad (1)$$

$$P_3 = P_3' + P_3'', \quad (2)$$

где $P_3' = \gamma P_3$, $P_3'' = (1 - \gamma) P_3$,
где γ - доля рециркуляции продувки;
 $(1 - \gamma)$ - доля сброса продувки;

$$P_{осв} = (P + P_3') \gamma_{осв}, \quad (3)$$

где $\gamma_{осв}$ - доля продувки осветлителя (отнесенная к производительности осветлителя (1...3 %% от расхода обрабатываемой в осветлителе воды)).

Тогда из (1) и (2):

$$P_{\text{осв}} = (P_1 + P_2 + P_3'' + P_{\text{осв}} + P_3') \gamma_{\text{осв}} \quad (4)$$

или

$$P_{\text{осв}} = \frac{\gamma_{\text{осв}}}{(1-\gamma)} (P_1 + P_2 + P_3). \quad (5)$$

С учетом (5) и (1) получим:

$$P_1 + P_2 + (1-\gamma)P_3 + \frac{\gamma_{\text{осв}}}{(1-\gamma)} (P_1 + P_2 + P_3). \quad (6)$$

Отсюда:

$$P = \frac{\gamma_{\text{осв}}}{(1-\gamma)} (P_1 + P_2 + P_3) - \gamma P_3. \quad (7)$$

С целью определения критической концентрации накипеобразователей, при которой возможны отложения на теплообменных поверхностях конденсатора [14 – 17] рассчитанные значения удельных величин P и $P_{\text{осв}}$ из (6), (7) далее используются для составления материально-солевого баланса исследуемой системы в целом.

Величина K_y ВХР КОСО определяется как соотношение ионов $[Na^+]$, $[Cl^-]$ в добавочной воде и циркуляционной воде. В связи с тем, что ионы натрия и хлорид-ионы при рециркуляции всегда проходят осветлитель транзитом, а ионы $[Mg^{2+}]$ и $[SO_4^{2-}]$ – только при некоторых режимах, материально-солевой баланс в первом приближении составляется для схемы, ограниченной пунктиром в точке Б (рис. 1).

Изменения концентрации ионов второй группы на данном этапе расчета не рассматриваются.

Материально-солевой баланс системы, ограниченной пунктирной линией, составляется для определения концентраций ионов $[Na^+]$, $[Cl^-]$ а также $[Mg^{2+}]$ и $[SO_4^{2-}]$ в граничных условиях растворимости дигидрата магния и сульфата кальция:

$$P \cdot [i]^{исх} = P_1 \cdot 0 + P_2 \cdot [i]^{oco} + P_{\text{осв}} \cdot [i]^{изв} + P_3'' \cdot [i]^{oco}. \quad (8)$$

Т. к. для этих примесей $[i]^{изв} = [i]^{cm}$:

$$P \cdot [i]^{исх} = P_1 \cdot 0 + P_2 \cdot [i]^{oco} + P_{\text{осв}} \cdot \frac{P \cdot [i]^{исх} + P_3' \cdot [i]^{oco}}{(P + P_3')} + P_3'' \cdot [i]^{oco}. \quad (9)$$

Отсюда:

$$P \cdot [i]^{исх} = \frac{P_{\text{осв}} \cdot P [i]^{исх}}{(P + P_3')} + \frac{P_{\text{осв}} \cdot P_3' [i]^{oco}}{(P + P_3')} + P_2 \cdot [i]^{oco} + P_3' \cdot [i]^{oco}. \quad (10)$$

Следовательно:

$$[i]^{oco} = [i]^{исх} \frac{P - P \cdot \frac{P_{\text{осв}}}{(P + P_3')}}{\frac{P_{\text{осв}} + P_3'}{(P + P_3')} + P_2 + P_3''} \quad (11)$$

$$K_y = \frac{P - P \cdot \frac{P_{\text{осв}}}{(P + P_3')}}{\frac{P_{\text{осв}} + P_3'}{(P + P_3')} + P_2 + P_3''}. \quad (12)$$

Материально-солевой баланс удельных величин добавочной воды P и рециркуляции продувки P_3' , а также их соледержания в точке смешения А выражается следующим образом:

$$(P + P_3') \cdot [i]^{cm} = P \cdot [i]^{исх} + P_3' \cdot [i]^{oco}. \quad (13)$$

Тогда для отдельно взятого иона:

$$[i]^{cm} = \frac{P \cdot [i]^{исх} + P_3' \cdot [i]^{oco}}{(P + P_3')}. \quad (14)$$

Если учесть, что концентрации ионов $[Na^+]$, $[Cl^-]$, $[Mg^{2+}]$, $[SO_4^{2-}]$ на входе и выходе из осветлителя остаются неизменными, то:

$$[Na^+]^{cm} = [Na^+]^{изв}, [Cl^-]^{cm} = [Cl^-]^{изв}, [Mg^{2+}]^{cm} = [Mg^{2+}]^{изв}, [SO_4^{2-}]^{cm} = [SO_4^{2-}]^{изв}. \quad (15)$$

Концентрации ионов $[HCO_3^-]$, $[CO_3^{2-}]$, $[OH^-]$ в процессе умягчения контролируются заданным режимом известкования. Концентрацию ионов $[Ca^{2+}]$ в умягченной воде с учетом (11), (13) и (14) можно определить на основании закона электронейтральности:

$$[Ca^{2+}]^{изв} = \Sigma An - [Mg^{2+}]^{изв} - [Na^+]^{изв}, \quad (16)$$

$[Щ_о]^{oco}$ рассчитывается по

$$[i]^{oco} = [i]^{изв} \cdot K_y. \quad (17)$$

Затем в циркуляционной воде рассчитываются концентрации ионов $[Na^+]$, $[Cl^-]$, $[Mg^{2+}]$, $[SO_4^{2-}]$, для чего рассматривается материально-солевой баланс системы, ограниченной штрихпунктирной линией (точка Б):

$$(P + P_3' - P_{\text{осв}}) \cdot [i]^{изв} = P_1 \cdot 0 + P_2 \cdot [i]^{oco} + P_3 \cdot [i]^{oco} \quad (18)$$

На основании (17) получим уравнение для определения концентраций отдельных ионов для различных ВХР:

$$[i]^{oco} = [i]^{изв} \frac{(P + P_3' - P_{ocв})}{(P_2 + P_3)}, \quad (19)$$

$$K_y = \frac{(P + P_3' - P_{ocв})}{(P_2 + P_3)}. \quad (20)$$

Достоверность расчетов подтверждается равенством концентрации $[Na^+]$ и $[Cl^-]$, рассчитанным по (19) и (11).

Все расчеты проводятся методом последовательных приближений (с учетом коэффициентов активности f' , f'').

По уравнению (21), полученному на основании системных лабораторных исследований, проведенных на кафедре технологии воды и топлива ОНПУ [18 – 20], а также промышленных испытаниях для различных классов вод рассчитывается скорость отложений, которую можно интерпретировать в величины удельной массы отложений (22) и толщин отложений (23):

$$|j_{отл}|_3^{oco} = A \cdot Ж_{Ca}, \quad (21)$$

где A – коэффициент зависящий от дозы ингибитора отложений.

Удельная масса отложений $|m_{отл}|_3^{oco}$, г/м² на теплообменной поверхности конденсаторов за отрезок время τ , ч рассчитывается по формуле:

$$|m_{отл}|_3^{oco} = |j_{отл}|_3^{oco} \cdot \tau. \quad (22)$$

Толщина отложений σ_3 , м ($\rho_{CaCO_3} = 1600$ кг/м³) рассчитывается по формуле:

$$\sigma_3 = \frac{|m_{отл}|_3^{oco}}{\rho_{CaCO_3}} \quad (23)$$

4. Результаты расчета скорости, массы и толщины отложений на ТПК

Полученные расчетные данные соответственно трансформируются в графические зависимости реальных значений скорости ($|j_{отл}|_3^{oco}$), массы ($|m_{отл}|_3^{oco}$) и толщины отложений (σ_3) (рис. 2, рис. 3, а, рис. 3, б) в зависимости от продувки (P_3) и качества кондиционирования добавочной воды (Ψ_0).

Полученные зависимости скорости, толщины и удельной массы отложений позволяют прогнозировать концентрации примесей теплоносителя ОСО при заданном значении удельной массы отложений на ТПК для выбранного сезона.

Результаты расчета позволяют выбрать оперативное значение величины части продувки КОСО на известкование P_3' при заданном качестве добавочной воды и коэффициенте упаривания K_y при проектировании новых схем охлаждения и реконструкции эксплуатируемых схем для обоснования срока эффективной и надежной эксплуатации конденсаторов.

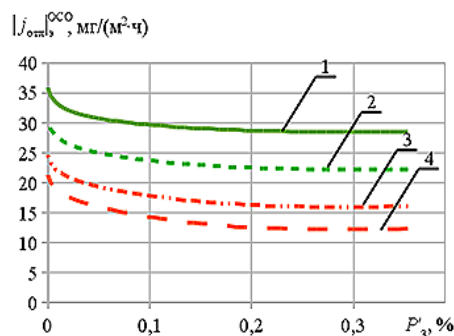


Рис. 2. Зависимость скорости отложения от величины продувки для различного качества добавочной воды: 1 – $\Psi_0=2$ мг-экв/дм³, 2 – $\Psi_0=1,5$ мг-экв/дм³, 3 – $\Psi_0=1$ мг-экв/дм³, 4 – $\Psi_0=0,7$ мг-экв/дм³

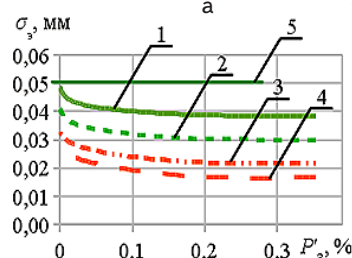
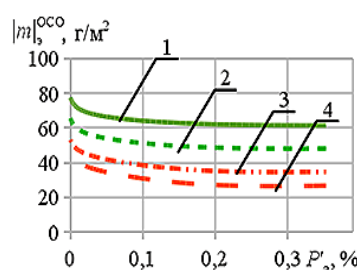


Рис. 3. Зависимость расчетных значений: а - массы отложений CaCO₃, б - толщины отложений CaCO₃ от удельной величины рециркуляции $P_3' = 0,35\%$:

1 – $\Psi_0=2$ мг-экв/дм³, 2 – $\Psi_0=1,5$ мг-экв/дм³, 3 – $\Psi_0=1$ мг-экв/дм³, 4 – $\Psi_0=0,7$ мг-экв/дм³, 5 – величина предельно допустимых отложений

5. Выводы

Разработана методика расчета эффективного ВХР КОСО с рециркуляцией части продувки на осветлитель и продувкой в окружающую среду с прогнозируемой величиной отложений на трубках конденсатора и концентрации сульфатов и хлоридов.

Использование технологической схемы (рис. 1) позволяет снизить забор речной воды на величину рециркуляции продувки, подаваемой на осветлитель и уменьшить на ту же величину количество сбросов в окружающую среду.

Вся продувка в окружающую среду P_3'' или ее часть, кроме регулирования концентрации хлоридов и сульфатов в циркуляционной воде, может быть исполь-

зована в качестве исходной для гибридных ВПУ при подготовке добавочной воды парогенератора.

Приведенная методика расчета может быть использована в качестве теоретического обоснова-

ния при разработке новых нормативных документов для ведения ВХР КОСО с прогнозируемыми результатами долгосрочной эффективной эксплуатации.

Литература

1. Walker, M. E. Economic impact of condenser fouling in existing thermo electric power plants [Text] / M. E. Walker, I. Safari, R. B. Theregowda // Energy. – 2012. – V. 44. – P. 429–437.
2. РД 34.37.307–87. Методические указания по прогнозированию химического состава и накипеобразующих свойств охлаждающей воды электростанций [Текст] : – Изд.офиц. – М. : СПО Союзтехэнерго. 1989. – 40 с.
3. ТР-М. 1234.05-051-03. Методичні рекомендації по проведенню хімічних промивок парогенераторів з боку другого контуру АЕС з реакторами типа ВВЕР [Текст] : – Офіц. вид. – К. : Энергоатом : Минтопэнерго України. 2008. – 28 с.
4. Боднар, Ю. Ф. Выбор критерия для оценки накипеобразующих свойств охлаждающей воды [Текст] / Ю. Ф. Боднар // Теплоэнергетика. – 1979. – № 7. – С. 65-68.
5. Kavitha, A. L. Evaluation of synthesized antiscalants for cooling water system application [Text] / A. L. Kavitha, T. Vasudevan, H. Gurumalles // Desalination. – 2011. – V. 268, № 1. – P.38–45.
6. Lee, S. H. Velocity effect on electronic–antifouling technology to mitigate mineral fouling in enhanced–tube heat exchanger [Text] / S. H. Lee, Y. I. Cho // Intern. J. Heat and Mass Transfer. – 2002. – № 45. – P. 4163 – 4174.
7. Кишневский, В. А. Способ известкования системы оборотного охлаждения АЭС [Текст] / В. А. Кишневский, В. В. Чиченин // Труды Одесск. политехн. ун-та. - 1999. - № 3(9). - С. 94-95.
8. Крушель, Г. Е. Образование и предотвращение отложений в системах водяного охлаждения [Текст] / Г. Е. Крушель. – М. – Л. : Госэнергоиздат, 1965.– 317 с.
9. Протасов, А. А. Гидробиология водоемов-охладителей тепловых и атомных электростанций Украины [Текст] / А. А. Протасов, О. А. Сергеева, С. И. Кошелева ; – К. : Наук. думка, 1991. – 192 с.
10. Методика расчета предельно допустимых сбросов (ПДС) веществ в водные объекты со сточными водами. [Текст] – Изд. Офиц. – Харьков : ВНИИВО. 1990. – 115 с.
11. Баулина, А. И. Обработка воды на электростанциях [Текст] / А. И. Баулина, С. М. Гурвич, В. М. Квятковский ; под общ. ред. В. А. Голубцова ; – М. – Л. : Энергия, 1966. – 448 с.
12. Терентьев, В. И. Выбор оптимального водно–химического режима работы водооборотных систем охлаждения с градирнями [Текст] / В. И. Терентьев, С. В. Караван // Энергосбережение и водоподготовка. – 2007. – № 3. – С. 20– 22.
13. Воронов, В. Н. Проблемы организации водно– химических режимов на тепловых электростанциях [Текст] / В. Н. Воронов, Т. И. Петрова // Теплоэнергетика. – 2002. – № 7. – С. 2– 6.
14. Kazi, N. Fouling and fouling mitigation on heated metal surfaces [Text] / N. Kazi, G. G. Duffy, X. D. Chen // Desalination. – 2012. – V. 288. – № 1. – P.126 –134.
15. Karabelas, A. J. Scale formation in tubular heat exchangers – research priorities [Text] / A. J. Karabelas // Intern. J. Thermal Sciences. – 2002. – № 41. – P. 682 – 692.
16. Muller–Steinhagen, H. Cooling water fouling in heat exchangers [Text] / H. Muller–Steinhagen // Advances in Heat Transfer – 1999. – № 33. – P. 415 – 496.
17. Krause, S. Fouling of heat transfer surfaces by crystallization and sedimentation [Text] / S. Krause // International Chemical Engineering. – 1993. – № 33. – P. 355 – 401.
18. Кишневский, В. А. Модель оборотной системы охлаждения [Текст] / В. А. Кишневский, В. И. Ковальчук, В. В. Чиченин // Труды Одесск. политехн. ун-та. – 2004. – №2 (22). – С. 99–101.
19. Кишневский, В. А. Отложение накипеобразователей в оборотных системах охлаждения [Текст] / В. А. Кишневский, В. И. Ковальчук, А. В. Наумов// Труды Одесск. политехн. ун-та. – 2006. – №1(25). – С. 69–71.
20. Кишневский, В. А. К расчету водно-химических режимов оборотных систем охлаждения с испарительными охладителями [Текст] / В. А. Кишневский, Е. В. Кишневский, В. В. Чиченин // Вода и водоочистные технологии. Научно-технические вести. – 2011. – №2(4). – С. 59–63.